第1章

上昇し続ける機器内部の熱対策には協調設計が必須

回路，メカ，基板設計者，みんなの共通課題をクリアするヒント

澤井由美子

小型化が進む機器においては，放熱対策が重要な設計課題の一つである．製品の性能を出すことに夢中になっている技術者は，試作初期から放熱を意識して取り組むことが少ない．ところが，試作初期から放熱を考慮して設計を始めないと，大幅な工程の後戻りが生じるだけではなく，場合によっては製品化そのものが困難になる．（編集部）

1 機器の温度上昇に潜むワナ

電子機器メーカ勤務2年目の都さんは，試作段階で悩んでいることがあります．担当したモバイル機器の内部温度が高く，プリント基板上に搭載されている画像処理LSIが動作保証温度範囲を超えてしまうことが分かったからです．

都さんは製品の機能仕様を満たすことを最優先して回路を設計していたため，放熱設計についてはほとんど検討していませんでした．そこで都さんは早速，放熱設計のセミナに行って講師の進さんに話を聞いてみることにしました．

図1　自然空冷を行うためきょう体に穴を開けた電子機器

電子機器における放熱設計の必要性が言われ始めてから既に数十年が経ちます．近年の電子機器は，急速な小型化および高性能化に伴って，機器の発熱密度がますます増大しており，放熱設計を必要とする電子機器の数は増え，対象となる機種も以前より多様化してきています．

私が放熱設計に携わるようになった初期（1990年代半ば）の放熱設計の対象は，まだワークステーションや携帯電話などの局側装置のような，やや大きな中央処理装置側の機器が多く，一般ユーザが使う端末側は発熱量もそれほど大きくありませんでした．そのため，きょう体内部の熱を逃がすために通気孔を開ける程度（図1）で温度仕様を十分満たしていました．

しかし，現在ではモバイル化が進んだことなどもあり，さまざまな電子機器（端末側）においても高性能化要求によるCPUの高速化などが進み，機器の発熱量は増大するばかりです（図2）．一方で，

- 小型パッケージの開発や，信号遅延を防ぐために配線長が短くなったことによる実装の高密度化
- 商品価値を高めるためのきょう体の小型化や樹脂化
- デザインやEMI（electro magnetic interference）重視による密閉化
- 静音要求の高まりやメンテナンス・フリーに伴うファンレス化

なども重要視されるようになっています．その結果，機器

KeyWord　通気孔，ファン，ダクト，ヒートシンク，ヒートパイプ，グラファイト・シート，サーマル・ビア，液冷，熱伝導シート，シリコン・グリース，セラミック塗料，鋼板＋塗装，サンド・ブラスト加工

図2　電子機器の発熱密度の推移（自然空冷を利用した機器）
10年ほど前までは自然空冷が可能となる発熱密度は10W/ℓ以下と言われていた．現在では10W/ℓ以上であっても自然空冷を要求されることが少なくない．

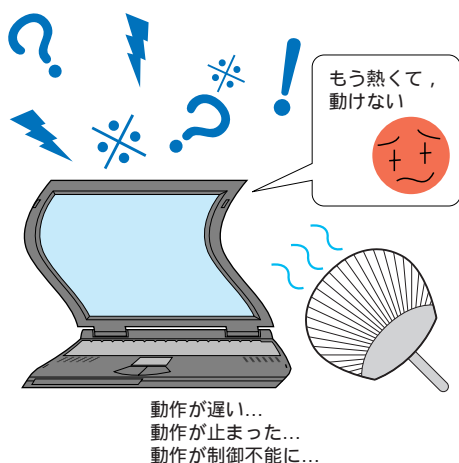
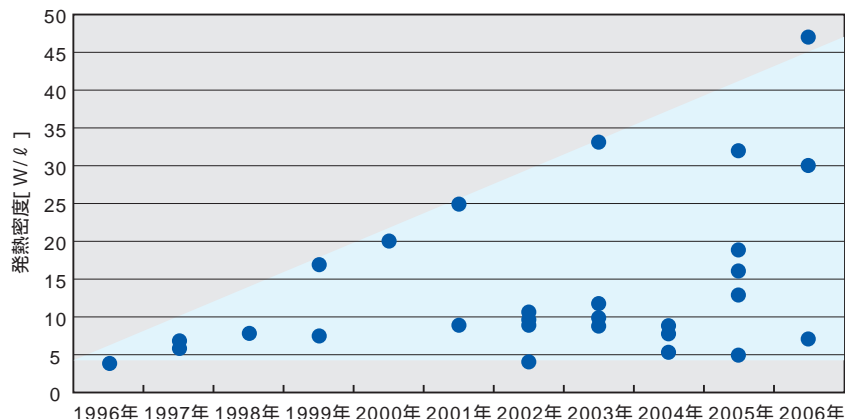



図3　熱暴走
プリント基板上の半導体温度が動作保証温度を超えると熱暴走（温度上昇による回路の誤動作）を引き起こし，安定した動作が保証されなくなる．

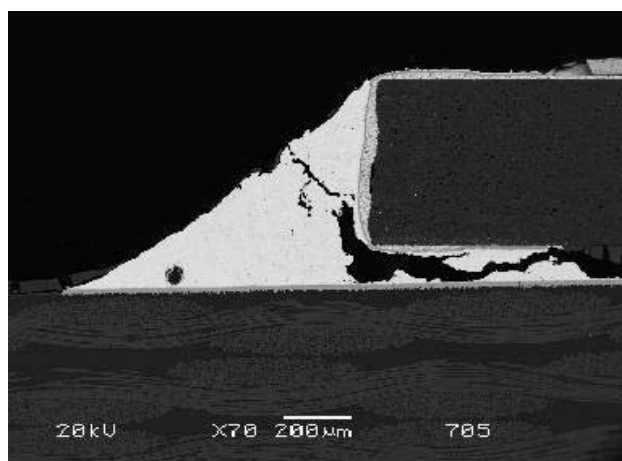



写真1[4]　基板に搭載されていたチップ部品が温度サイクル試験後にはく離した様子

の発熱密度は増大する一方となり，あらゆる電子機器において放熱設計が重要な設計要素の一つとなっています．

：なるほど，設計者が配慮しなければならない項目が増えたと言うことですね．実際，電子機器内部の発熱密度が高くなり，きょう体表面や内部に実装されている半導体パッケージの温度が高くなると，どのような問題が発生するのでしょうか．

：電子機器の温度上昇は深刻な問題です．機能の信頼性が損なわれたり，製品の寿命が短くなったり，人体への安全性が損なわれたりします．

：もう少し詳しく知りたいので，代表的な例を挙げて教えていただけますか．

：まず，機能の信頼性保証についてお話しします．一般的に半導体は，温度が上昇すると電気抵抗が下がり，より多くの電流が流れるようになります．これにより，「さらに温度上昇→電気抵抗の低下→温度上昇」の繰り返しとなり，熱暴走（温度上昇による回路の誤動作）を引き起こし，安定した動作が保証されなくなってしまいます（**図3**）．

次に，製品の長寿命保証についてですが，電子部品は熱膨張係数の異なるさまざまな物質で構成されているため，温度が上昇すると熱応力が発生します．例えば，はんだクラックが発生するなどして，故障率が高まって寿命が短くなったりします（**写真1**）．

：熱暴走，恐いですね．そういえば，コンデンサも周囲温度が高いと寿命が短くなります．

：それだけではありません．電子機器から熱風が吐き出されると，使う人に不快感を与えたり，きょう体表面が高温過ぎた場合にはやけどなど人体への危険を及ぼすこともあります．

：放熱設計（温度コントロール）を適切に行わないと，機能の信頼性，製品の寿命，人体への安全性な

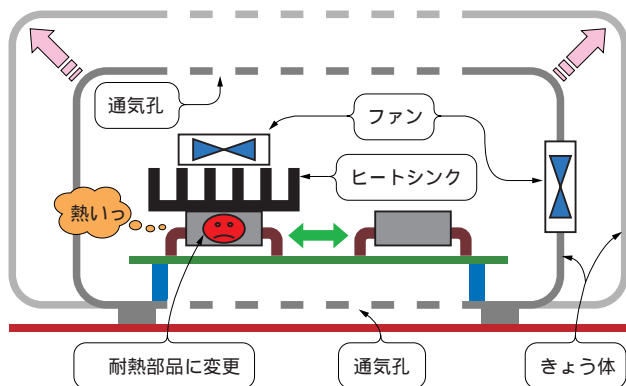



図4　放熱対策のあれこれ

温度仕様を満たしていない半導体部品の放熱対策は，①ヒートシンク，②局所冷却ファン，③通気孔または換気ファン，④近傍の部品との間隔をあけて熱干渉を緩和，⑤耐熱部品に変更，⑥筐体サイズ大型化などがある．

どの保証ができなくなるのですね．

2 事後の放熱対策に潜むわな

：放熱対策は電子機器開発の重要な設計要素であることは分かりました．ところで，放熱設計は開発工程のどのタイミングで行えばよいのでしょうか．試作後の温度測定で温度仕様を満たしていないことが判明してから，対策を行えばよいのでしょうか．

：例えば，プリント基板に実装した半導体部品のパッケージ表面温度が仕様を満たしていない場合を考えてみます．対策としては，

1) 半導体部品のパッケージ表面にヒートシンクやアルミ板を取り付けて，熱伝導により熱を拡散させる．
2) 半導体部品の近傍に小型ファンを取り付けて，対流による放熱を促進させる．
3) きょう体に通気孔またはファンを追加して，きょう体内部に滞っている熱風を外部へ排出する．
4) 半導体部品の配置を変更して，高温部品同士の熱干渉を緩和する．
5) 半導体部品を耐熱部品へ変更する．
6) きょう体サイズを大きくして，きょう体内の発熱密度を小さくする．

などがあります（図4）．

：なるほど，試作後にこれだけの対策を行うとしたら，大きな手戻りを伴う危険が潜んでいますね．

：そうなんです，そこに気がついて欲しかったのです．それでは，上記1)～6)について詳しく説明します．

1) ヒートシンクなどを選定する際は，それを取り付ける半導体部品の発熱量と許容温度上昇値からヒートシンクの熱抵抗値を算出するため，熱に弱い（許容温度上昇値が小さい）半導体部品ほど，ヒートシンクに要求される熱抵抗値は小さくなります．

一般的に熱抵抗値が小さいほどヒートシンクのサイズは大きくなるため，熱に弱い半導体部品ほど周辺に大きなスペースが必要となります．しかし，半導体部品周辺に背の高いコンデンサやコネクタ類がある場合は，きょう体とのすき間が狭いため，必要なサイズのヒートシンクを取り付けることができない事態が発生します．

ヒートシンクを取り付けるだけで問題を解決できるはずが，部品配置の変更（プリント基板の再製作）やきょう体サイズの変更にまで影響がおよび，大きな手戻りが生じる場合も少なくありません．

2) 半導体部品近傍にファンを取り付ける際も，ヒートシンクと同じように周辺に大きなスペースが必要となったり，ファン用の回路をプリント基板に新たに追加しなければならなくなります．

3) きょう体に通気孔を開ける際には，そのことにより電磁波が外に漏れ出し，再試作後に別途EMI対策が必要になることもあります．また，きょう体に全体を冷却するためのファンを取り付ける際は，スペース確保のためにきょう体そのものを大きくする必要が生じることもあります．さらに，流路上に大きな障害物があれば，配置変更をしなければならなくなります．

：小型化したためにさまざまな問題が生じたのですね．ファンを取り付けるためにきょう体を大きくするなんて，許されそうにないですね．それに，ファンを取り付けたら，それだけで消費電流が増えて電源の温度も上昇します．

：ファン取り付けのときだけではありません．部品配置を変更するとなると，もっと大変なことになります．

4) 部品配置を変更する際には，プリント基板の再製作はもちろんですが，高密度実装時にはプリント基板を大きくしなければ配置変更ができない場合もあり，最悪の場合きょう体サイズまで変更しなければならなくなります．

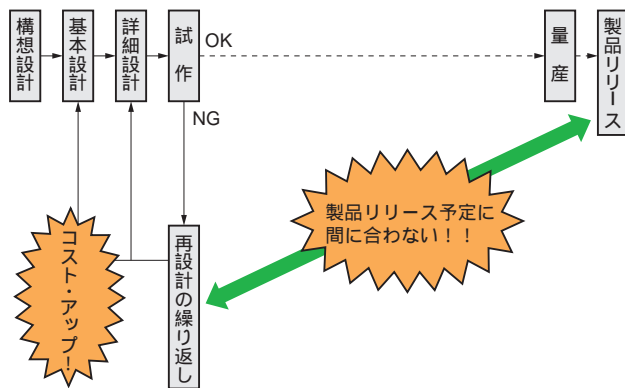



図5　製品開発時の問題
試作後に熱的な問題が発生して再設計を行っても，制約条件の多い中での対策は試行錯誤となることも多く，製品リリースに間に合わなくなる可能性もある．

図6　三つの放熱経路
放熱の経路には，熱伝達，熱伝導，熱放射（放射）の3種類がある．

5) 耐熱部品に変更する場合には，部品サイズが異なることもあり，その結果，ほかの部品ときょう体との間に干渉が発生し，プリント基板やきょう体も大きな設計変更を必要とする場合もあります．

6) きょう体を大きくすることは，製品の使用環境などの制約によりファンを取り付けることができない場合に有効な手段です．しかし，商品価値（小型化）が維持できず，商品化を断念せざるを得ない状況にもなりかねません．

：回路にも実装にも問題がない製品が，熱の問題で出荷できないのですね．確かに今後はこのような問題が増えてきそうですね．

：そうですよ．しかも，電子機器の開発期間は年々短縮される傾向にあるため，試作後に発生した熱的な問題の対策を検討していては，製品リリースに間に合わなくなります（**図5**）．従って，電子機器の放熱対策は試作後の温度測定後ではなく，設計初期の段階に熱的な問題を把握し，できる限りの対策を施すことにより設計の確度を高めておくことが求められます．

：それが製品仕様を満たすための非常に重要な鍵なのですね．ところで，放熱対策にはどのようなツールがあるのでしょうか．

：では，次項では具体的な放熱対策方法を紹介しましょう．

3 放熱，どのような対策法がある？

：放熱の経路には，熱伝達，熱伝導，熱放射（放射）の3種類があります（**図6**）．放熱対策の検討には，おのおのに適合したツールを選びます．ここでは，どのようなツールがあるのかを紹介します．

まず一つめの熱伝達による放熱効果を高めるツールとして，通気孔，ファン（きょう体全体冷却用および局所冷却用），ダクトなどがあります．

通気孔［**図7(a)**］は，きょう体内部の熱を自然対流により外へ排出させるための孔（あな）です．加工費だけで放熱できるため手軽ですが，EMIやきょう体強度などを考慮する必要があります．

ファンは強制的に送風することで，部品パッケージ表面の熱伝達による放熱を向上させたり，きょう体内部の熱を外へ排出させます［**図7(b)**］．最も手軽で効果の高い放熱対策ですが，騒音や機器内へのちり流入も考慮する必要があります．

ダクトは煙突効果を利用したものです．温かい空気が煙突内を上昇すると煙突下部の圧力が下がるので，冷たい空気が流入しやすくなり対流が促進できます（**図7(c)**）．しかし，大きなスペースが必要となるため，私の知る限り，きょう体の小型化が要求される最近の製品にはほとんど使われていません．

：使う側としては，通気孔からプリント基板が見えたりしたら，安っぽく感じたり，不安になったりするかもしれません．

：そうですね．性能うんぬんもありますが，見た目からしても，できるだけ通気孔はない方がよいでしょう．

二つめの熱伝導による放熱効果を高めるツールとして，ヒートシンク，ヒートパイプ，グラファイト・シート，プ

(a) 通気孔

(b) ファン

(c) ダクト

(d) ヒートシンク

(e) ヒートパイプにおける毛細管現象

基板銅はくパターン：電気的な接続と共に，発熱体の熱を拡散させる．また，適切な銅はくパターン幅を確保することで，銅はくパターンを流れる電流の電気抵抗による発熱を低減できる．
サーマル・ビア：プリント基板は，熱伝導率の低い絶縁層と熱伝導率の高い銅はくパターンが積層構造となっているため，プリント基板の裏面への伝熱量は少ない．そのため，サーマル・ビアを使い，プリント基板裏面に熱を伝導させることで，熱を拡散させ放熱面積を拡大させる．

(f) 銅はくパターンとサーマル・ビア

(g) 冷液

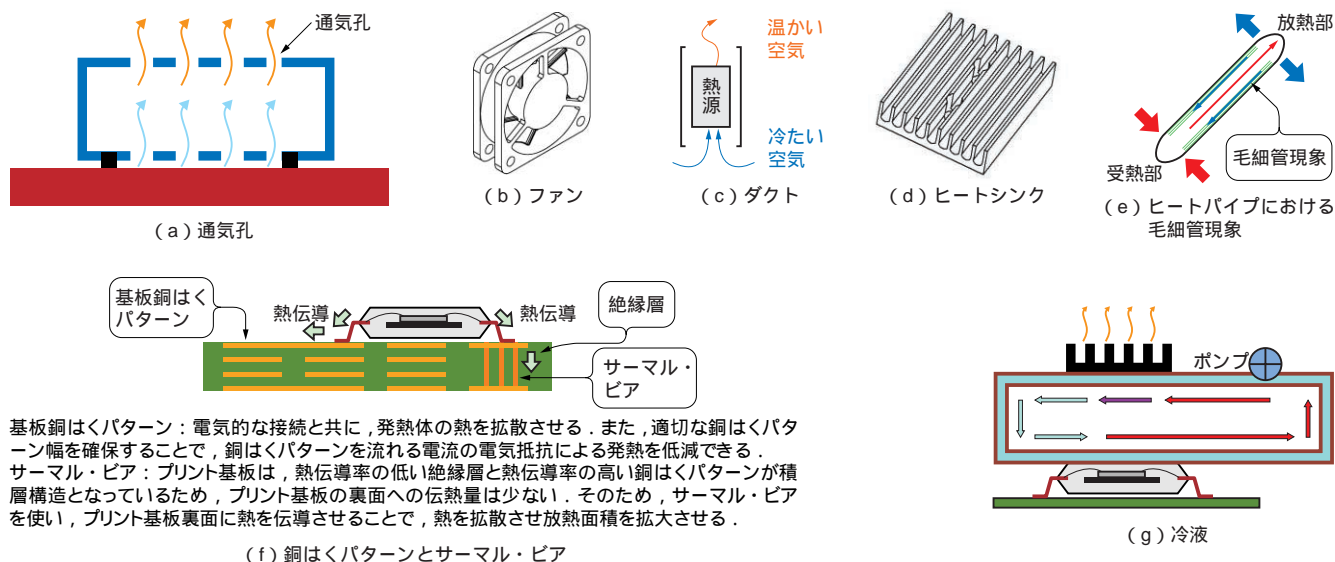
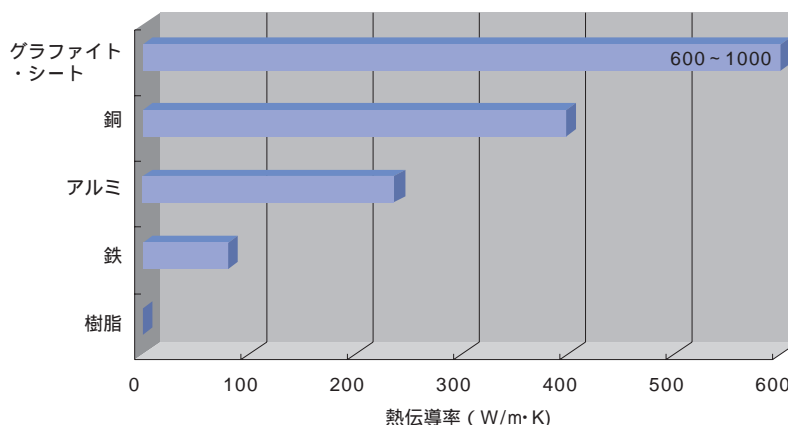



図7 放熱対策ツールあれこれ

図8
各種材料の熱伝導率の比較（代表値）
グラファイト・シートは，炭素の同素体である黒鉛をシート状に加工したもの．熱伝導率が銅やアルミなどより高く薄いため，小型きょう体内の熱拡散に有効．

リント配線板銅はくパターン，サーマル・ビア，液冷，熱伝導シート，シリコン・グリースなどがあります．

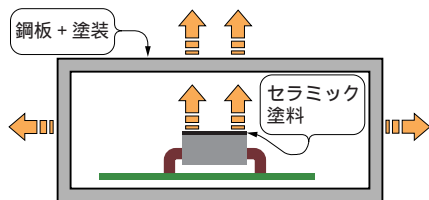
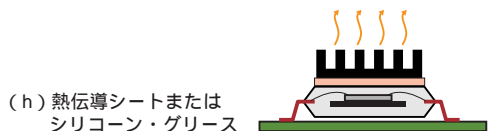
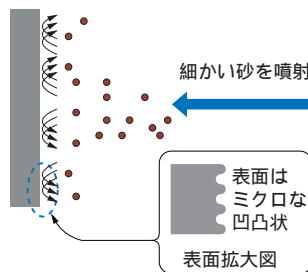
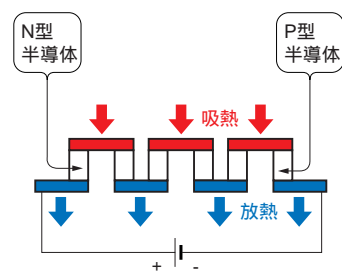
ヒートシンクは熱伝導率の高いアルミや銅などから作られ，表面積が広くなるような形状をしています［**図7（d）**］．このヒートシンクに熱を伝導，拡散させることで，放熱面積を拡大させて放熱効果を高めることができますが，EMI発生のアンテナとなることもあります．

ヒートパイプは細い金属の密閉パイプでできており，内部には少量の水などの作動液が入っています．細管の一端（入熱部）を熱源に接触させると作動液が気化し，低温の他端（放熱部）へ移動し，放熱されます．放熱部によって冷やされた作動液は液体となり，毛細管現象により再び入熱部へと戻って，再度このサイクルを繰り返します．このため，非常に小さな温度上昇で大きな熱輸送を行うことが可能となります［**図7（e）**］．

グラファイト・シートは，炭素の同素体である黒鉛をシート状に加工したものです．熱伝導率が銅やアルミなどより高く（**図8**）非常に薄いため，小型きょう体内の熱拡散に有効です．最近では携帯電話やノート・パソコン，ゲーム機器などの放熱にも利用されています．

プリント基板の銅はくパターンとサーマル・ビア［**図7（f）**］は，プリント基板に実装した部品の熱をプリント基板内に伝導して拡散させます．

液冷は水や不凍液などの液体をパイプに入れ，それをポンプでヒートシンクなどの放熱部へ移動させます［**図7（g）**］．水の比熱は空気の約4倍なので，非常に小さな温度上昇で

(h) 熱伝導シートまたはシリコーン・グリース

(i) セラミック塗料または鋼板＋塗料

(j) サンド・ブラスト加工

(k) ペルチェ効果

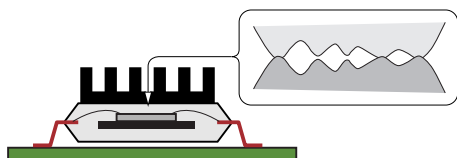



図9　ICとヒートシンクの接触面

平らに見えるが，実際はミクロな凹凸がある．

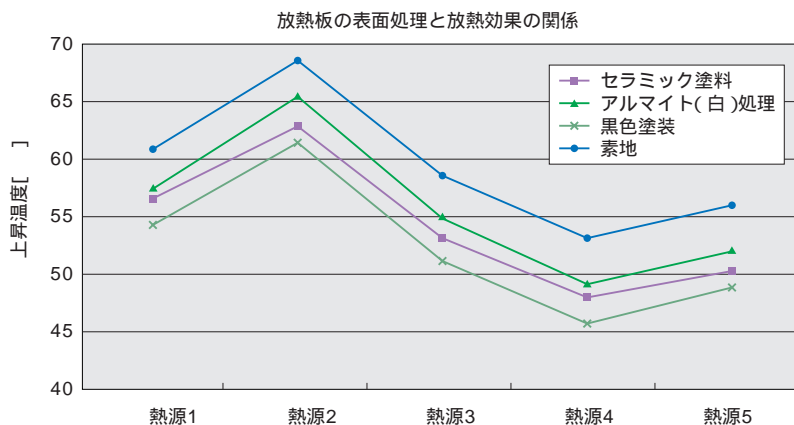
放熱板の表面処理と放熱効果の関係

上昇温度［℃］

70, 65, 60, 55, 50, 45, 40

熱源1　熱源2　熱源3　熱源4　熱源5

セラミック塗料
アルマイト（白）処理
黒色塗装
素地

図10
半導体に取り付けたヒートシンクの表面加工方法と半導体の温度上昇値の比較

大きな熱輸送が可能となります．最近では大型のホスト・コンピュータだけでなく，ノート・パソコンの放熱にも利用されています．

熱伝導シートとシリコーン・グリース［図7(h)］は，ヒートシンクなどの取り付けの際に生じる接触熱抵抗を小さくするものです．通常，物体の表面は平らに見えていますが，実際はミクロな凹凸があるため，物体と物体を接触させても点接触しかしておらず(図9)，熱伝導による放熱が減少してしまいます．このミクロな凹凸部分にシリコーン・グリースを塗布したり，弾力性のある熱伝導シートを挿入したりすることで，伝熱量を向上させられます．

：三つめの熱放射よる放熱効果を高めるツールとして，セラミック塗料(部品表面，きょう体内外面)，鋼板＋塗装，サンド・ブラスト(sand blast)加工などがあります．

セラミック塗料または鋼板＋塗装を行うと，放射率を0.9～0.96程度まで向上させられます［図7(i)］．なお，通常の金属生地の放射率は0.1以下です．これらの効果を測定した結果を図10に示します．

サンド・ブラスト加工は，比較的放射率の低い金属生地に細かい砂を噴射することで，表面に細かい凹凸(すりガラスのような表面)を形成して［図7(j)］，放射率を向上させます．

：熱伝達，熱伝導，熱放射ですね．なるほど，これらを検討すれば，熱を外へ逃がすことができそうです．

：さらに，これらには属さない冷却ツールとして，ペルチェ素子があります．異なる金属の接合部に電流を流すと，片側の金属面で吸熱が起こり，反対側の金属面に熱を移動・放熱します［ペルチェ効果，図7(k)］．クーラ・ボックスやレーザ・ダイオードなどの冷却に利用されています．

このように，放熱の手段はたくさんあります．それぞれの効果の大きさや注意点を表1にまとめました．設計する電子機器の使用環境や設計コスト，および商品コンセプトから最適なツールを選定して組み合わせます．

表1
放熱対策ツールの比較
筆者の主観で評価した．

	項　目	効果	注意する点
熱伝達	通気孔	○	EMIや筐体強度
	ファン	○	騒音や機器内への粉塵流入
	ダクト	△	大きなスペースが必要
熱伝導	ヒートシンク	○	EMI発生のアンテナ
	ヒートパイプ	◎	受熱部を下側に配置した方が効果が高い
	グラファイト・シート	◎	導電体であるため絶縁加工が必要な場合もある
	基板銅はくパターン	△	―
	サーマル・ビア	△	―
	液冷	◎	液漏れ・低温時の凍結
	熱伝導シート シリコーン・グリース	○	均一に塗布または加圧が必要
熱放射	セラミック塗料	○	金属素地など，放射率の低い物質のみ効果が大きい
	鋼板＋塗料	○	金属素地など，放射率の低い物質のみ効果が大きい
	サンドブラスト	―	金属素地など，放射率の低い物質のみ効果が大きい
その他	ペルチェ素子	◎	結露

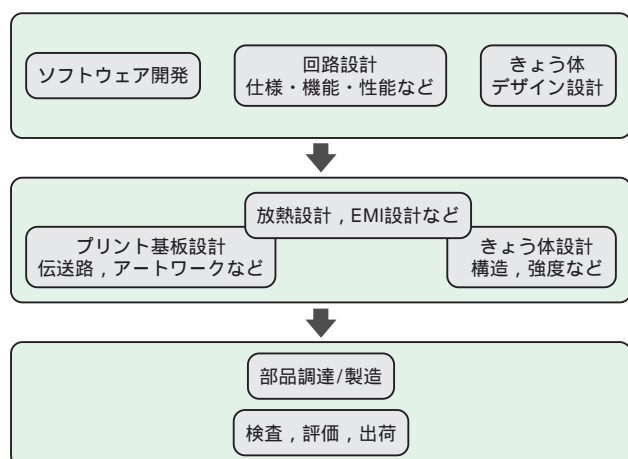



図11　製品の開発工程
回路設計およびきょう体設計，プリント基板設計などの異なる設計が同時に進行する．

：そういえば，放熱対策は設計の初期段階からと教わりました．しかし，まだ試作機のない段階ではどのように放熱を検討すればよいのでしょうか．

：良い質問です．前述の放熱対策ツールを使いこなすためには，設計者の長年の経験や勘だけではなく，計算流体力学(computational fluid dynamics：CFD)シミュレーションの活用も不可欠となってきています．現在の電子機器の放熱設計は，ヒートシンクやファンを取り付けるだけでは解決できなくなっています．そのため，放熱効果の高い複雑な構造を検討し，その効果を確認するには，試作機を作って温度を評価する前にシミュレーション上で製品を作り(3次元でモデル化する)，疑似的な実験を行って，最適な放熱設計を行うことが必要不可欠なのです．

また，放熱対策は各設計間(回路設計，プリント基板設計，きょう体設計など)において，トレードオフの関係となることが多いです．例えば，放熱の観点から通気孔は必要と判断しても，EMIの観点から不利になる場合があります．また，放熱の観点から部品配置は間隔を開けた方がよいと判断しても，伝送路の信号ノイズや遅延の観点からは不利になる場合があります．これらを調整する際に，定量的な判断を行うための材料としても，試作前のシミュレーションは有効です．なお，シミュレーションの活用法については，特集の第2章と第3章でも触れています．

4 放熱設計は誰が行うべきなのか

：現在の電子機器の開発工程は，競争力強化のために以前よりも短期化されています．そのため，製品の開発においては，回路設計およびきょう体設計，プリント基板設計などの異なる設計が同時に進行します(**図11**)．では，放熱設計は誰がリードするべきなのでしょうか．きょう体設計者でしょうか，それともプリント基板設計者でしょうか．

：前述の通り放熱設計ツールにはさまざまなものがあり，きょう体設計での対策(通気孔やファン)やプリント基板設計での対策(銅はくパターンやスルー・ホール)，またはきょう体設計とプリント基板設計が連携して取り付け構造を考える必要のある対策(ヒートシンクやグラファイト・シート)などがあります．また，これらの対策は同時に，EMIや伝送路にも影響を与えるため，各設計間においてトレードオフの関係となることが多々あります．

従って放熱設計は，これらの異なる設計分野が互いに連携して行う必要があります（図12）．

理想的には，放熱設計の専任者が，

各設計分野における熱に関連したリスク要素の洗い出し→シミュレーションによる定性的，定量的な温度予測→各設計分野との調整（リスクのトレードオフ）

を行うことが，効率良く最適な放熱設計を実現できる仕組みと考えます．

必ずしも放熱設計の専任者が必要というわけではありません．大切なことは，各設計分野が協力して熱的リスク回避のための連携と調整を行うことです．これは放熱設計の専任者でなくてもできることです．きょう体設計者でもプリント基板設計者でもできます．よりスムーズに開発を進めるためには，熱的リスクの高い部門，あるいは設計の自由度の高い部門が放熱設計を担当したほうが，問題を早く収束させられます．

：ありがとうございます．大切なのは連携と調整なのですね．さっそく私の担当する機種について，考えてみたいと思います．

図12　放熱設計と各設計との連携
異なる設計分野が互いに影響を与えるため，連携して設計を行う必要がある．

参考・引用*文献

(1) 伊藤謹司，国峰尚樹；トラブルを避けるための電子機器の熱対策設計，1992年，日刊工業新聞社．
(2) 国峰尚樹；エレクトロニクスのための熱設計完全入門，1997年，日刊工業新聞社
(3) ヒートパイプ，日立電線．
http://www.hitachi-cable.co.jp/copper/coppergoods/heatpipe/
(4)* 八甫谷 明彦；製造容易性や機械的信頼性が高いプリント基板の設計テクニック11連発，Design Wave Magazine，2007年2月号，p.71.

さわい・ゆみこ
住友電工システムソリューション（株）
シムデザイン・テクノセンター

<筆者プロフィール>
澤井由美子．入社以来ずっと，LAN製品やセキュリティ関連製品，自動車関連製品の放熱設計一筋．今では，家電量販店に行って新製品のパソコンやゲーム機を見ると，放熱構造はどんな感じになっているのだろう…と，分解して，内部を見たい衝動に駆られる．